

На правах рукописи

Ковалев Федор Дмитриевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ФОТОФОРЕЗА В ГАЗАХ**

Специальность
01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Екатеринбург, 2003

Работа выполнена на кафедре общей и молекулярной физики и в отделе теплофизики и поверхностных явлений НИИ физики и прикладной математики Уральского государственного университета **им. А.М.Горького**.

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор **Суетин П.Е.**

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук, профессор Селезнев В.Д.

доктор физико-математических наук Скрипов П.В.

Ведущее учреждение: Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук

Защита состоится «27» мая 2003 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Уральском государственном университете им. А.М.Горького (620083, г. Екатеринбург, К-83, пр. Ленина, 51, **комн.248**).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета **им. А.М.горького**.

Автореферат разослан «26» апреля 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного **совета**
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник



Кудреватых Н.В.

1. Актуальность проблемы. Поглощение электромагнитной энергии аэрозольными частицами является первопричиной многочисленных динамических процессов, в том числе движения частиц в поле направленного излучения. Явление **фотофореза** аэрозолей состоит в возникновении сил радиометрической **природы**, действующих на неоднородно нагретые излучением частицы в разреженном газе [1]. **Исследования** свойств радиометрического фотофореза продемонстрировали **его** большие потенциальные возможности в прецизионных аэрозольных технологиях и **нанотехнологиях**, газоочистке, в лабораторных методиках удержания частиц в ловушках и т.д. Значимую роль **фотофорез** играет и в динамических процессах с атмосферными аэрозолями. В частности, при поглощении частицами солнечного и уходящего с земной поверхности инфракрасного излучения могут возникать интенсивные вертикальные перемещения атмосферных аэрозолей определенных типов (в первую очередь, сажевых частиц) на больших высотах (в верхней тропосфере и стратосфере). Такого рода эффекты могут существенно влиять на **радиационный** баланс атмосферы и должны корректно учитываться в моделях вертикального переноса аэрозолей в стратосфере.

В настоящее время существуют теории фотофореза, основанные на решении газокINETического уравнения **Больцмана** и использовании теории **Ми**, позволяющие рассчитать силу и скорость движения частиц во всем диапазоне чисел **Кнудсена** при учете их оптических, **теплофизических** и аккомодационных свойств [2,3]. В то же время экспериментальные исследования фотофореза по различным методикам зачастую носят качественный и несистематический характер, не охватывая достаточный диапазон определяющих параметров **проблемы** и не позволяя провести корректное сравнение с существующими теориями. Используемая в работе методика модельного эксперимента позволяет измерить **фотофоретические силы**, действующие на макроскопические частицы, моделирующие реальные аэрозоли, в максимально широком диапазоне параметров, а значит **детально** проанализировать газокINETический аспект проблемы и провести критическое сопоставление результатов с теоретическими предсказаниями.

Диссертационная работа выполнена в рамках исследований, проводимых лабораторией физики аэрозолей НИИ **ФГМ** при **УрГУ** (тема 2.2.5/1). Работа также **поддерживалась** грантами РФФИ № 96-01-00756, № 99-01-00143 и № 01-01-96451.

2. Дели и задачи работы. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование фотофореза в широком диапазоне параметров частиц и газов с использованием модельного метода, т.е. измерение **фотофоретической** силы, действующей на макроскопическую модельную частицу в вакууме, как функции давления газа, интенсивности излучения, оптических и теплофизических свойств модельных частиц и газов. Для достижения цели решены следующие задачи:

усовершенствована модельная методика измерения **фотофоретической** силы с помощью крутильных весов в условиях вакуума;

разработана оригинальная методика измерения интенсивности излучения в условиях вакуума;

разработана оригинальная методика определения факторов поглощения и асимметрии поглощения для модельных частиц;

проведены измерения **теплофизических** (удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности) и оптических (факторы поглощения и асимметрии поглощения) свойств модельных частиц;

исследовано температурное поле на поверхности модельной частицы, испытывающей фотофорез;

проведены измерения фотофоретической силы для случаев положительного и отрицательного эффекта, исследованы зависимости фотофоретической силы от интенсивности **излучения**, размера частицы, давления **газа**, характера взаимодействия молекул газа с поверхностью частицы.

3. Научная **новизна**. Впервые проведены *систематические* измерения фотофоретической силы в диапазоне чисел **Кнудсена** 0,001 - 20, **интенсивностей** излучения 500 - 3000 Вт/м², относительных **теплопроводностей** частиц и газов 6 - 400 с использованием макроскопических модельных сферических частиц радиусом 0,5 - 10 **мм**, общая погрешность которых не превышает 15-20%. Для измерений фотофоретической силы в диапазоне $5 \cdot 10^{-8}$ - $5 \cdot 10^{-5}$ Н применены **откалиброванные** крутильные весы с емкостным датчиком смещения коромысла и электростатической компенсацией измеряемой силы.

Впервые **экспериментально** исследовано температурное поле на поверхности **частицы**, испытывающей фотофорез, и подтверждены теоретические выводы о факторах, определяющих величину и распределение температуры по поверхности частицы и **характер** этого распределения.

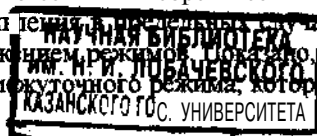
Новым является вывод о совместном влиянии на величину фотофоретической силы коэффициентов аккомодации энергии и нормального импульса молекул газа на поверхности частицы.

Новыми являются результаты исследования зависимости фотофоретической силы от размера частицы при различных давлениях **газа**, в частности, зависимости показателя степени радиуса частицы от давления газа.

Впервые с применением модельной методики исследован отрицательный фотофорез.

4. Научная и практическая **ценность**. Усовершенствованная модельная методика может быть применена для исследования ряда других эффектов с аэрозольными частицами (фотофорез в резонансно возбужденном газе, **термофорез**, **диффузиофорез** и т.д.).

Результаты настоящего исследования зависимостей фотофоретической силы от определяющих параметров позволяют сделать вывод о применимости известных теоретических моделей **фотофореза** для описания этого явления в разреженных газах, в том числе в **свободномолекулярном** и вязком со скольжением режимах. Показано, что единственной адекватной теорией для промежуточного режима, которая дает верные результаты и в



дельных случаях является теория **С.А.Береснева, В.Г.Черняка и Г.А.Фомягина** [2].

Показано, что положительный и отрицательный **фотофорез** является проявлением радиометрического эффекта, а не вызван существенным различием в **коэффициентах** аккомодации молекул газа на различных участках поверхности **частицы**, как в предлагаемой Г. Рохачеком модели аккомодационного **фотофореза** [8].

5. Достоверность результатов обеспечивается использованием стандартных измерительных приборов и методик проведения измерений, обеспечивающих хорошую воспроизводимость результатов; постоянным контролем основных параметров эксперимента (**температуры**, интенсивности **излучения**, давления **газа**, калибровочного коэффициента крутильных весов, который определяется двумя независимыми способами); проведением ряда вспомогательных экспериментов по изучению свойств модельных частиц; применением современных методов **статистической** обработки исходных экспериментальных данных.

6. На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. обоснование **модельной** методики исследования фотофореза аэрозольных частиц;
2. обоснование выбранных диапазонов изменения параметров эксперимента и отбор материалов модельных частиц;
3. экспериментальные результаты для **фотофоретической** силы как функции параметров **эксперимента**;
4. экспериментально **подтвержденный** вывод о радиометрической природе как положительного, так и отрицательного фотофореза;
5. выводы о границах применимости различных теорий фотофореза;
6. вывод о совместном влиянии на величину фотофоретической силы коэффициентов аккомодации энергии и нормального импульса молекул газа на поверхности частицы.

7. Личный вклад автора. Обсуждение направления исследования, экспериментальных задач, используемых методов исследования, получаемых экспериментальных результатов и их сравнение с теорией проводились на семинарах лаборатории физики аэрозолей совместно с научным руководителем профессором **Суетиным П.Е.** и доцентом **Бересневым С.А.** Вспомогательные эксперименты по разработке методики измерения интенсивности излучения в условиях вакуумной камеры проведены совместно со студентом физического факультета **Рунковым В.А.**, по измерению теплопроводности модельных частиц со студентом **Гулиным М.В.** В экспериментах по измерению фотофоретической силы принимал участие студент **Шишкин А.Д.** Все основные результаты и выводы работы получены автором лично. Автор признателен **Г.П.Быстраю** за предоставленную экспериментальную базу.

8. Апробация работы. Результаты работы были представлены и обсуждались на

- о Европейской аэрозольной **конференции ЕАС-2001** (г. Лейпциг, 3 – 7 сентября, 2001 г.);

- о VIII Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г.Томск, ИОА СО РАН, 27 - 30 ноября 2001 г.);
- о IX Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г.Томск, ИОА СО РАН, 26 - 29 ноября 2002г.);
- о Всероссийском семинаре «Кинетическая теория и динамика разреженных газов» (г. Новосибирск, ИТФ СО РАН, 2 - 7 декабря 2002 г.).

Отдельные части работы были представлены на V Международной конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (г. Новосибирск, ИТФ СО РАН, 27 - 30 апреля 1998 г.), Второй Национальной Конференции по теплообмену (г. Москва, МЭИ. 26 - 30 октября 1998 г.), Европейской аэрозольной конференции ЕАС-1999 (г. Прага, 6 - 10 сентября, 1999 г.); V Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г.Томск, ИОА СО РАН, 23 - 27 ноября 1999 г.);

9. **Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в т.ч. 3 статьи, список которых приведен в конце автореферата.

10. объем и **структура** работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (92 наименования) и одиннадцати приложений в виде таблиц экспериментальных результатов. Общий объем работы составляет 133 страницы, содержит 52 рисунков, 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность экспериментального исследования **фотофореза**, рассмотрена его роль в качестве механизма вертикального переноса аэрозолей в стратосфере Земли, кратко изложена история исследования этого **явления**, сформулирована цель работы.

В **первой** главе приводится краткий обзор теоретических и экспериментальных результатов исследования фотофореза. Рассматриваются процессы, приводящие к возникновению радиометрической **фотофоретической** силы, действующей на **аэрозольную** частицу в разреженном газе. Экспериментальные методы исследования фотофореза анализируются с точки зрения **информативности**, возможности сравнения результатов с данными настоящей работы и с теоретическими моделями.

Общая схема решения задачи о **фотофорезе** представляется в следующем виде. Рассматривается сферическая частица радиуса R_0 с коэффициентом теплопроводности λ_p и комплексным показателем преломления $n = m + i\kappa$, находящаяся в бесконечном газе. **Вдали** от частицы газ находится в равновесии при температуре T_0 и давлении p_0 . Вязкость газа η , его теплопроводность λ_g . С одной стороны на частицу падает электромагнитное излучение интенсивностью I_0 произвольной фиксированной длины волны X и произвольной поляризации (рис. 1.). Взаимодействие излучения с газом носит нерезонансный характер.

Ход решения может быть разбит на три этапа. 1. Электромагнитное излучение, поглощаясь в объеме частицы, переходит в тепловую энергию.

Локальное распределение возникающих таким образом источников тепла может быть описано некоторой функцией источников. 2. Тепло распространяется в объеме частицы за счет ее теплопроводности. 3. Тепло передается с поверхности частицы в окружающую среду за счет излучения и взаимодействия с молекулами окружающего газа. Обмен энергией и импульсом поверхности частицы и окружающего газа приводит к возникновению **фотофоретической** силы.

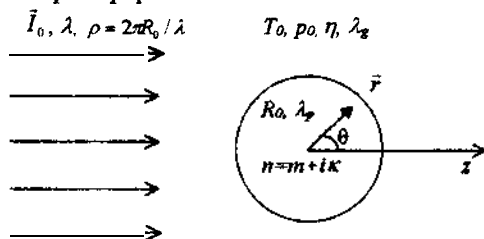


Рис. 1. К постановке задачи о фотофорезе

Эти процессы рассматриваются при решении, соответственно, электродинамической, **теплофизической** и газокINETической задач. При этом если последние два механизма оказываются неразрывно **связанными**

через граничные условия на поверхности частицы, то первый - возникновение источников тепла внутри частицы - определяется только ее оптическими свойствами и в линейной по интенсивности излучения постановке задачи может быть рассмотрен независимо. Оптические свойства частицы описываются одним интегральным коэффициентом - фактором асимметрии поглощения излучения J_1 [4]:

$$J_1 = \frac{3nk}{\rho} \int_0^\pi \sin\theta \cdot P_1(\cos\theta) d\theta \int_0^1 x^3 B(x, \theta, \phi = \pi/4) dx \quad (1)$$

В общем случае излучение не является монохроматическим, поэтому необходимо провести усреднение по длинам волн [3]

$$\langle J_1 \rangle = \frac{1}{\sigma T_R^4} \int_0^\infty J_1(\rho, m) I_\lambda(T_R) d\lambda \quad (2)$$

Яламовым и др. [4] показано, что J_1 не зависят от характера поляризации падающего излучения, поскольку характеризует поглощенное излучение. Значения фактора асимметрии J_1 лежат в пределах от -1/2 (абсолютно поглощающая **частица**, сильнее нагрета фронтальная сторона) до +1/2 (обратная ситуация, сильнее нагрета теневая сторона). Направление фотофоретической силы определяется только знаком J_1 . При $J_1 < 0$ имеет место положительный **фотофорез** (сила действует по направлению распространения излучения), при $J_1 > 0$ - отрицательный (сила действует **навстречу** падающему излучению). Для макроскопических частиц он может быть определен по коэффициенту поглощения или из измерений температуры поверхности в различных точках. Это позволяет исследовать газокINETический аспект **фотофореза** независимо от оптического в модельных экспериментах.

Как и во всех газокINETических **задачах**, механизм возникновения силы и его характерные свойства существенно зависят от степени разреженности газа, которую удобно выразить в виде **числа Кнудсена** $Kn = l/R_0$ -

отношения длины свободного пробега молекул газа / к **характерному** размеру задачи (в данном случае - радиусу частицы). По этому **принципу** можно выделить три области чисел **Кнудсена**. В вязком со скольжением режиме ($Kn \ll 1$) сила является результатом теплового скольжения (термокрипа) газа вдоль неоднородно нагретой поверхности частицы. В **свободномолекулярном** режиме ($Kn \gg 1$) механизм возникновения силы **кнудсеновский**, молекулярный (**нескомпенсированность** импульсов, уносимых молекулами газа с более нагретой и более холодной стороны частицы). В переходном режиме, при промежуточных числах **Кнудсена**, наблюдается суперпозиция этих двух механизмов, и **достигается** максимум **фотофоретической** силы. Разделение на режимы по числам Кнудсена предопределяет также и подход к решению задачи о **фотофорезе**. В **частности**, точные аналитические решения возможны лишь в предельных случаях.

Наиболее общие и к тому же удобные для практического использования результаты были получены в работах **Береснева С.А.**, Черняка ВТ. и **Фомягина Г.А.** [3]. Кинетическое уравнение с интегралом **столкновений** в форме **S-модели** [S] решалось в широком диапазоне чисел Кнудсена при произвольных значениях относительной теплопроводности частицы и газа L и коэффициентов аккомодации **энергии**, нормального и тангенциально-го импульса. В работе получено выражение для любых значений параметров:

$$F_{ph} = -\frac{2\pi}{3} \left(\frac{m}{8k_B T_0} \right)^{\frac{1}{2}} R_0^2 J_0 J_1 \frac{\alpha_E \Psi_1}{\left(\alpha_E + \frac{15(1-\alpha_E) \Lambda Kn}{4} \right) \Psi_2 + \alpha_E \Lambda \Psi_3} \quad (3)$$

где k_B - постоянная **Больцмана**, α_E , α_n , α_t - коэффициенты аккомодации энергии, нормального и тангенциального импульса молекул газа, $\Psi_i = f_{i1} + (1-\alpha_t)f_{21} + (1-\alpha_n)f_{31} + (1-\alpha_t)(1-\alpha_n)f_{41}$ являются функциями только числа Кнудсена, а **значения** f_{ji} табулированы для диапазона чисел Кнудсена 0,001÷100.

Все опубликованные на данный момент экспериментальные работы по **фотофорезу** носят качественный характер либо неполны из-за неопределенности ряда параметров или ограниченности диапазона их юменения. К наиболее перспективным экспериментальным методикам следует отнести использование электродинамического баланса и видеосъемку движущихся частиц. Однако сложность в определении **теплофизических** свойств реальных частиц и возникновение термоконвективной силы затрудняют интерпретацию результатов. **Модельная** методика открывает возможность аккуратного независимого определения **всех** необходимых параметров при всестороннем исследовании газокинетического аспекта **фотофореза**. Возможности моделирования по числам Кнудсена в известных на сегодняшний день работах реализованы далеко не полностью.

Вторая глава посвящена исследованию **свойств** модельных частиц. Проведено обоснование возможности адекватного моделирования фотофореза макроскопическими сферами из общедоступных материалов. **Оце-**

нены минимальные размеры **частиц**, на которые **могут** распространяться выводы данной работы. На основе анализа диапазонов изменения параметров, определяющих величину **фотофоретической** силы, и возможности их использования в условиях вакуума произведен отбор материалов модельных частиц. Для выбранных частиц проведены измерения коэффициентов теплопроводности (таблица 1), факторов поглощения и асимметрии поглощения излучения (таблица 2), исследован характер температурного поля на поверхности модельных **частиц**, его зависимость от интенсивности **излучения**, времени и давления газа. Показано, что для макроскопических модельных частиц в эксперименте реализуется приближение одиночной частицы в бесконечном газе. С точки зрения электродинамики реализуется предел геометрической оптики, где частицы предполагаются крупными, поглощающими излучение в тонком поверхностном слое.

Таблица 1. Теплопроводность модельных частиц

Материал частицы	Радиус a , 10^{-3} м	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость C , Дж/кг К	Коэффициент теплопроводности λ_p , Вт/м К
Черное стекло	$7,62 \pm 0,01$	2240 ± 50	760 ± 25	$1,2 \pm 0,07$
Графит 1	$8,11 \pm 0,01$	2040 ± 60	680 ± 30	$6,5 \pm 0,2$
Графит 2	$8,54 \pm 0,01$	1680 ± 50	600 ± 40	$6,2 \pm 0,3$
Резина вакуумная	$3,4 \pm 0,01$	1180 ± 40	1380 ± 30	$0,18 \pm 0,01$
Фторопласт Ф-4	$9,6 \pm 0,01$	1520 ± 30	1150 ± 50	$0,28 \pm 0,01$
Сталь 12Х18Н10Т	$5,21 \pm 0,01$	7800 ± 50	488 ± 10	$14,8 \pm 0,5$

Таблица 2. Оптические свойства модельных частиц

Материал частицы	Радиус R_0 , 10^{-3} м	Фактор поглощения $4J_0$		Фактор асимметрии J_1	
		$K_n \ll 1$	$K_n \gg 1$	$K_n \ll 1$	$K_n \gg 1$
Черное стекло	7,6	0.72 ± 0.03	0.73 ± 0.03	-0.41 ± 0.03	-0.43 ± 0.02
Графит	8,1	0.7 ± 0.02	0.8 ± 0.03	-0.48 ± 0.03	-0.45 ± 0.02
Фторопласт Ф-4	9,6	0.64 ± 0.03	0.66 ± 0.02	-0.33 ± 0.02	-0.31 ± 0.02
Сталь 12Х18Н10Т	5,21	0.52 ± 0.03	0.55 ± 0.03	-0.31 ± 0.03	-0.28 ± 0.03

В третьей главе описывается экспериментальная установка и методика измерений, оцениваются погрешности измерений и факторы, отличные от **фотофореза**, способные влиять на результаты измерений.

Экспериментальная установка обеспечивает измерение малых сил,

действующих на макроскопическое тело в **вакууме**. Экспериментальная установка состоит из термостатированной вакуумной камеры, системы откачки, напуска газа и измерения давления, использовавшихся ранее [6, 7], источника света с измерителем мощности излучения и системы измерения силы. Блок-схема установки представлена на рис.2. Исследуемый образец подвешивается на кварцевом стержне на крутильных **весах**, производится откачка рабочей **камеры**, измерение интенсивности излучения, напуск газа до требуемого давления. Освещение образца приводит к его неоднородному нагреванию и появлению **фотофоретической** силы, которая регистрируется с помощью крутильных весов.

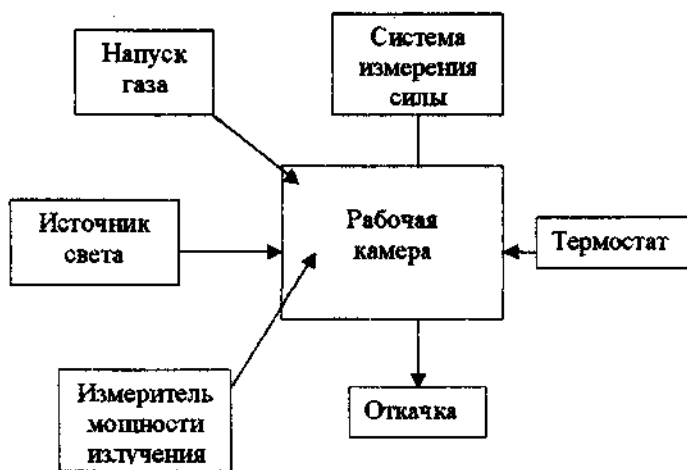


Рис.2. Блок-схема экспериментальной установки

Крутильные весы представляют собой систему измерения горизонтально действующей силы в диапазоне $5 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-5}$ Н по нулевому методу. В них использован емкостной датчик смещения и электростатическая **компенсация** измеряемой силы. Вся конструкция вынесена за пределы рабочей камеры и размещена в отдельном корпусе. В камере находится только образец, подвешенный на длинном (60 см) тонком (0,5 мм) кварцевом стержне и противовес, размещенный у самого дна камеры. Это позволяет исключить **влияние** газовых потоков и температурных градиентов на механизм весов. Схема весов приведена на рис.3. Медное коромысло подвешено на полоске из **бериллиевой** бронзы длиной 72 мм, шириной 1,2 мм и толщиной 0,05 мм. Прямоугольное сечение полоски обеспечивает стабильность нулевого положения весов. В процессе эксперимента возможна подстройка нулевого положения с помощью латунного **стержня**, выведенного за пределы вакуумной камеры. Крутильная жесткость нити подвеса была измерена методом малых крутильных колебаний и составила $(4,9 \pm 0,2) 10^{-6}$ Н·м. На одном конце коромысла крепится кварцевая нить

подвеса образца и противовеса, **обеспечивающий горизонтальное** положение коромысла, на другом укреплен круглый медный электрод диаметром 29 мм. Электрический контакт с электродом осуществляется через нить подвеса весов.

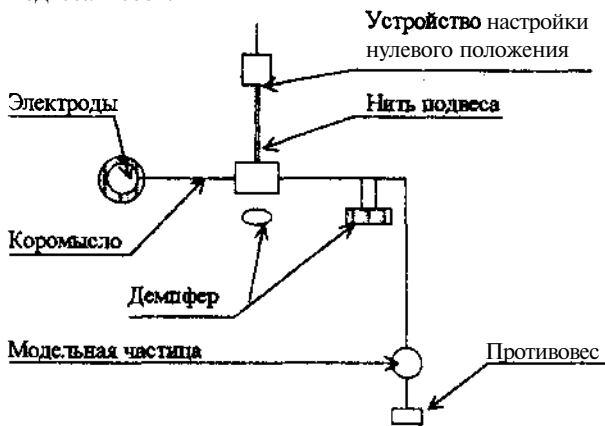


Рис.3. Крутильные весы

Сама по себе эта конструкция уже позволяет определить силу, действующую на **образец**, по величине его смещения, измеренного, например, катетометром. Чувствительность ее составляет порядка $3,4 \cdot 10^{-7}$ Н/мм, что уже достаточно для целей настоящего эксперимента. Однако для повышения

точности измерений был применен так называемый нулевой метод, когда измеряемая сила компенсируется, так чтобы смещение коромысла было равно нулю.

Для этого подвижный электрод помещен между двумя неподвижными электродами большего радиуса, электрически изолированными от корпуса. Таким образом, подвижный и неподвижные электроды образуют два конденсатора, один из которых включен в **LC-контур** высокочастотного генератора и служит датчиком смещения. Второй конденсатор непосредственно подключен к стабилизированному регулируемому источнику постоянного напряжения и дает возможность электростатически компенсировать смещение коромысла.

Фотофоретическая сила, действующая на частицу в горизонтальном направлении, вызывает поворот коромысла, что приводит к изменению расстояния между электродами и вызывает изменение частоты генератора, которая измеряется частотомером **ЧЗ-34**. Коромысло может быть возвращено в исходное положение постоянным напряжением, измеряемым вольтметром Ш301-1. Для стабилизации частоты генератор помещен в отдельном массивном латунном корпусе. Его частота составляет 10500 кГц, а чувствительность к смещению коромысла около 350 **кГц/мм**.

Центр тяжести коромысла расположен существенно ниже точки подвеса. В сочетании с большим моментом инерции - период собственных колебаний коромысла составляет 46 **секунд**, - это обеспечивает хорошую устойчивость весов по отношению к случайным возмущениям. Однако, с другой стороны, большой момент инерции означает, что если крутильные колебания коромысла все-таки возникнут, то добиться их релаксации бу-

дет очень трудно, особенно в вакууме. Поэтому в **конструкцию** включены также пассивные магнитные демпферы и чашечка с вакуумным маслом, демпфирующим паразитные колебания за счет вязкого трения. Отличительной особенностью описанных выше крутильных весов от использовавшихся в [7] является их нечувствительность к точности электростатической компенсации измеряемой силы.

Источником света служит галогенная лампа накаливания КГМ-300-30-2 (номинальная мощность 300 Вт) с коллиматором, что позволяет **получить** параллельный световой **пучок**. Спектр излучения лампы близок к солнечному в видимой и инфракрасной областях, однако в нем практически отсутствует ультрафиолет. Для модельных **частиц** дифракционный параметр $\rho = \frac{2\pi R_0}{\lambda}$, где λ - длина волны падающего излучения много

больше 100, что соответствует пределу геометрической оптики для всего спектра излучения лампы, поэтому монохроматичность излучения не играет роли.

После выполнения всех предварительных **измерений**, и настройки крутильных весов измерения **фотофоретической** силы выполнялись по **следующей** методике. Очередная модельная частица подвешивалась на кварцевом стержне на коромысле крутильных весов. Коромысло уравнивалось с помощью грузов на противовесе, затем устанавливалось его нулевое положение относительно неподвижных электродов. Камера герметизировалась и откачивалась в течение 15 – 20 часов. Длительная откачка позволяла уменьшить **натекание** в 2 – 3 раза. После откачки камера заполнялась исследуемым газом до давления около 0,1 Торр, затем вновь откачивалась, т.е. проводилась «промывка» камеры исследуемым газом. Перед началом измерений камера **термостатировалась**, что обеспечивало отсутствие на стенках камеры градиентов **температуры**, способных вызвать неучтенное **криповое** или конвективное движение газа. После установления стационарного режима (около 2 – 2,5 часов) весы градуировались. Далее производился напуск **газа** до требуемого давления, и, после стабилизации весов, фиксировалась «нулевая» частота генератора. Включался источник света и измерялась его интенсивность. После **чего** свет попадал на частицу, вызывая ее неоднородный нагрев. **Фотофоретическая** сила вызывала отклонение весов. Приложенное компенсирующее напряжение возвращало весы в исходное положение. Считывалась соответствующая частота генератора и величина напряжения. Время одного опыта составляло **от** 10 до 25 минут. Затем опыт повторялся при других давлениях газа и **интенсивностях** излучения. Повторная градуировка весов проводилась каждые 2 – 3 часа. Поскольку достаточное для обработки число точек было невозможно получить за один проход по давлениям, измерения с одной частицей в одном и том же газе проводились в течение недели. **Это** позволило при постоянном контроле всех параметров установки обеспечить хорошую воспроизводимость результатов измерений и набрать обширную статистику для обработки исходных зависимостей фотофоретической силы от давления газа и интенсивности излучения.

Четвертая **глава** посвящена экспериментальным результатам их об- суждению, сравнению с теорией и результатами других авторов.

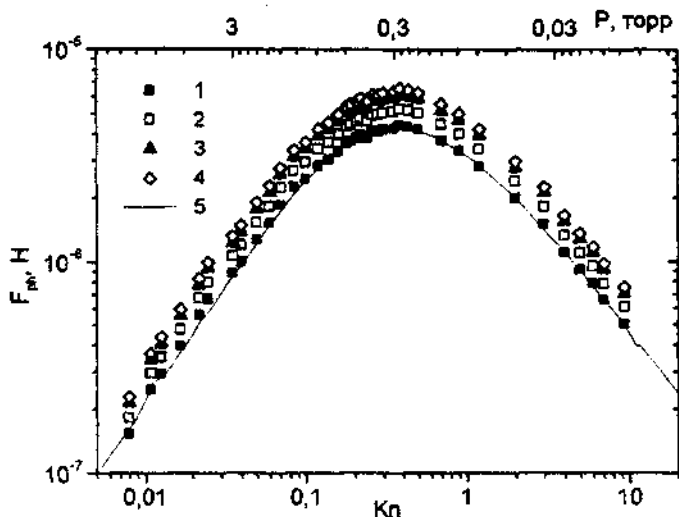


Рис. 4. Стеклоянная частица в гелии при **различных** **интенсивностях** излучения, Вт/м^2 : 1 - 2000, 2 - 2400, 3 - 2800, 4 - 3000, 5 - сравнение с теорией (3)

Зависимость фотофоретической силы от рода и степени разреженности газа (числа Кнудсена). На рисунках 4, 5 представлены экспериментальные результаты для фотофоретической силы как функции числа Кнудсена при **нескольких** интенсивностях излучения. Во всех случаях зависимости подобны и имеют характерный для радиометрического **фотофореза колоколообразный** вид. В области чисел Кнудсена $Kn < 0.1$ **фотофоретическая** сила прямо **пропорциональна Kn** , а при $Kn > 2$ - обратно пропорциональна Kn . Максимум фотофоретической силы достигается в диапазоне $0.2 < Kn < 0.5$ независимо от размера частиц. На положение максимума слабо влияет состояние поверхности частицы, что особенно заметно для гелия. В случае шероховатых поверхностей максимум смещается в сторону больших чисел Кнудсена (графит и фторопласт Ф-4). Состояние поверхности в теории учитывается через коэффициенты аккомодации энергии и импульса молекул газа. Для гелия характерно значительное отличие коэффициентов аккомодации от единицы, поэтому именно для него обнаруживается такая зависимость.

Из требования наилучшего согласия экспериментальной и теоретической зависимостей фотофоретической силы от числа Кнудсена определялись значения коэффициентов **аккомодации** энергии, **нормального** и тангенциального импульса, удовлетворяющие условию $\alpha_E < \alpha_n < \alpha_\tau$. Из анализа полученных таким образом комбинаций числовых значений коэффи-

циентов аккомодации можно сделать следующие выводы. Отсутствует зависимость **фотофоретической силы**, выходящая за пределы экспериментальной **погрешности**, от коэффициента аккомодации тангенциального импульса, если его значения лежат в интервале $0,9 < \alpha_t < 1$. Поскольку для поверхностей, не **подвергавшихся** специальной обработке, коэффициент аккомодации тангенциального импульса не выходит за пределы указанного интервала, для всей последующей обработки результатов эксперимента он принимался равным единице.

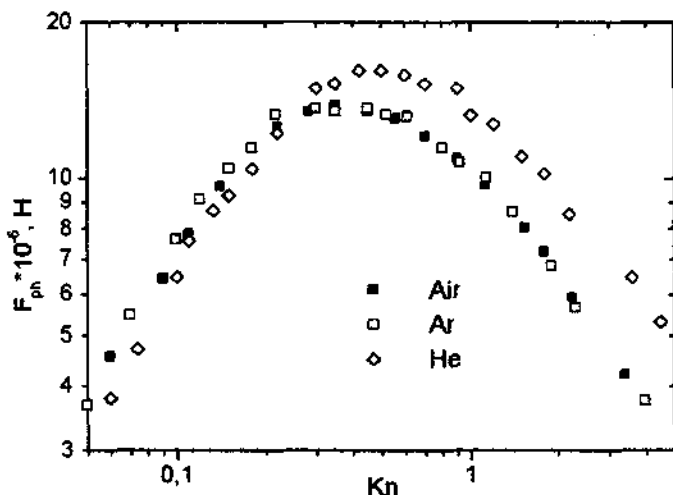


Рис.5. Частица из фторопласта **Φ4** в различных газах

Коэффициенты аккомодации энергии и нормального импульса не могут быть определены одновременно, а только как некоторый «радиометрический» коэффициент аккомодации. Для его корректного определения удобно перейти к безразмерной **фотофоретической силе**, определяемой выражением

$$F^* = \frac{F_{ph}}{F_{fm}}, \quad (4)$$

где F_{ph} - размерная **фотофоретическая сила**, F_{fm} - сила в свободно-молекулярном пределе при полной аккомодации энергии и импульса молекул газа ($\alpha_E = \alpha_n = \alpha_t = 1$). Тогда безразмерная **фотофоретическая сила** F^* оказывается функцией числа **Кнудсена** и относительной теплопроводности частицы и газа, а в **свободномолекулярном** режиме ($Kn \rightarrow \infty$) выражение (4) стремится к пределу

$$F^{**} = \frac{32\alpha_E\alpha_n}{32 - \pi(9 - \alpha_E)(1 - \alpha_n)} \quad (5)$$

Таблица 3. Радиометрические коэффициенты аккомодации

Система частица - газ	F^{**} , по (5)	$\alpha_n \alpha_E$
Сталь в гелии	0,47	$0,35 \pm 0,07$
Графит в гелии	0,57	$0,48 \pm 0,07$
Стекло в гелии	0,47	$0,35 \pm 0,05$
Фторопласт Ф-4 в гелии	0,57	$0,48 \pm 0,05$
Графит в аргоне	0,9	0,9010,05
Стекло в аргоне	0,9	0,9110,05
Фторопласт Ф-4 в аргоне	0,9	0,88Ю,05
Графит в воздухе	1,0	$1,00 \pm 0,05$
Стекло в воздухе	1,0	1,0010,05
Фторопласт Ф-4 в воздухе	1,0	1,0010,05

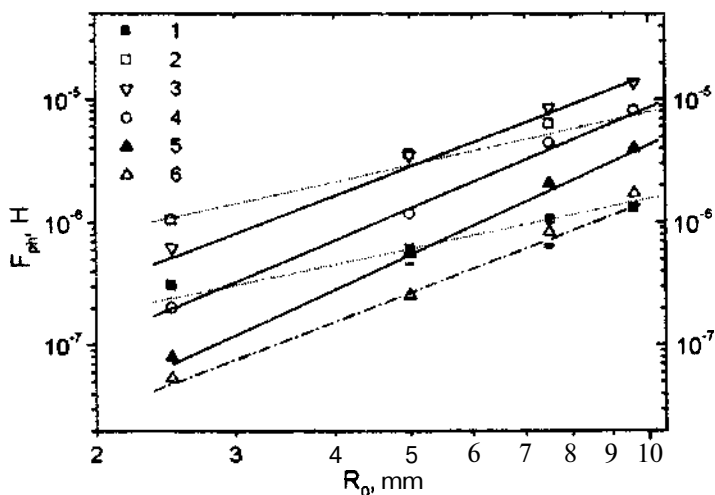


Рис. 6. Зависимость фотофоретической силы от радиуса частицы для фторопласта Ф-4 при интенсивности излучения 2000 Вт/м^2 и различных давлениях воздуха (Торр): 1 - 1,4; 2 - 0,18; 3 - 0,055; 4 - 0,01; 5 - 0,006; 6 - 0,002.

Таким образом, можно назвать «радиометрическим» коэффициентом аккомодации безразмерный комплекс (5). Анализ зависимостей от числа Кнудсена размерной и безразмерной фотофоретической сил позволяет вычислить его значения для исследованных систем газ - частица. Эти результаты представлены в таблице 3. Следует отметить, что полученные значения не противоречат широко известным данным по аккомодации энергии и нормального импульса.

Фотофоретическая сила оказывается прямо пропорциональной такому «радиометрическому» коэффициенту аккомодации и достигает макси-

мально возможных значений при полной аккомодации энергии и импульса молекул газа на поверхности частицы.

Хорошее согласие теории [2] с результатами настоящего эксперимента показывает ее применимость для описания **фотофореза** во всем диапазоне чисел **Кнудсена**. Подбором соответствующего значения «радиометрического» коэффициента аккомодации удастся в пределах экспериментальной погрешности описывать полученные для всех модельных частиц результаты.

Сравнение результатов данной работы с [6,7] представлено на **рис.7**. Значительная неопределенность в определении интенсивности излучения и возможное изменение интенсивности в процессе измерений в [6, 7] приводит к заметным отличиям результатов, представленных на рис. 7. Еще одна причина этих **отличий** может быть связана с крутильными весами [6, 7]: их чувствительности к точности электростатической компенсации измеряемой силы или неучтенным **дрейфом** нулевого положения.

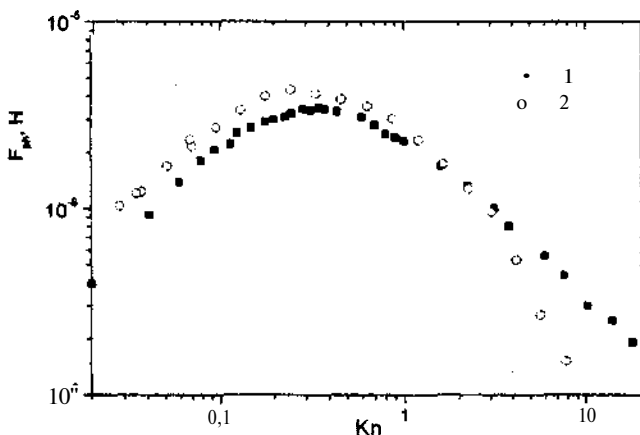


Рис.7. Стекла́нная частица в аргоне при интенсивности излучения 2000 Вт/м² 1 - результат данной работы, 2 - **Боголепов А.И., Быстрый Г.П.** [6, 7]

Зависимость фотофоретической силы от размера частицы. Для экспериментального исследования этой зависимости в данной работе использовались сферические частицы из фторопласта **Ф-4** различных радиусов: 9,6 мм, 7,5 мм, 5,0 мм и 2,5 мм. Остальные свойства этих частиц были одинаковы. Измерения фотофоретической силы производились для каждой частицы в воздухе при различных давлениях и **интенсивностях** излучения. **Зависимость** силы от радиуса линейная при высоких **давлениях**, при понижении давления она становится квадратичной, а в сильно разреженном **газе** приближается к кубической (рис.6).

Зависимость фотофоретической силы от относительной теплопроводности частицы и газа. В эксперименте материалы частиц подобраны

таким образом, что относительная теплопроводность **частицы** и газа $L = \lambda_p / Xg$ варьируется от 1,9 для фторопласта **Ф-4** в гелии до 382 для графита в аргоне. **Экспериментальные** точки достаточно равномерно распределены в указанном интервале. Для анализа зависимости **фотофоретической** силы от относительной теплопроводности вновь удобно воспользоваться **безразмерной** величиной F^* , которая определяется выражением (4). На рис. 8 дается сравнение расчета по (4) для случаев полной аккомодации и минимального «радиометрического» коэффициента (5) с экспериментальными **точками**, полученными делением измеренных значений фотофоретической силы при минимальной интенсивности излучения на расчетные значения F_{fm} при соответствующих значениях давления и других параметров. Хотя разброс точек **велик**, что связано с различием в коэффициентах аккомодации, все они лежат в пределах коридора, ограниченного теоретическими кривыми.

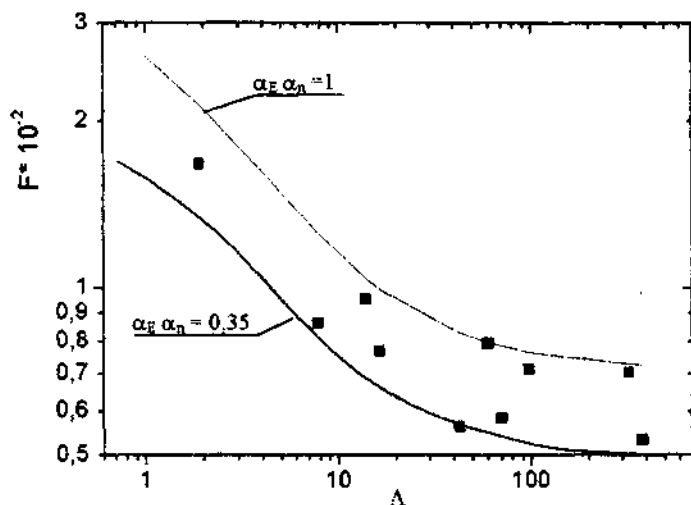


Рис. 8. Зависимость **безразмерной** фотофоретической силы от относительной теплопроводности частицы и **газа**.

Зависимость фотофоретической силы от интенсивности излучения и пределы применимости линейной теории

Результаты измерений фотофоретической силы в зависимости от интенсивности падающего на частицу излучения, которая варьировалась в пределах 500 - 3000 Вт/м², представлены на рис. 9. Для сильно теплопроводных частиц ($L > 40$) во всем диапазоне исследованных параметров зависимость фотофоретической силы от интенсивности излучения линейная. Для слабо теплопроводных частиц ($L < 15$) наблюдается отклонение от

линейной зависимости **при интенсивностях** излучения больших 2500 Вт/м^2 . Сила несколько **уменьшается**, причем отклонения от линейности тем больше, чем ниже давление газа. При больших давлениях для таких частиц сохраняется линейная зависимость **фотофоретической** силы от интенсивности излучения. В [7] обнаружены отклонения от линейности в зависимости фотофоретической силы от интенсивности **излучения** для модельных частиц типа полых стеклянных сфер. Однако из-за неопределенности в **таких** параметрах как теплопроводность (неизвестно герметичная сфера или нет) и фактор асимметрии поглощения J_1 корректно сравнить его данные с теорией затруднительно.

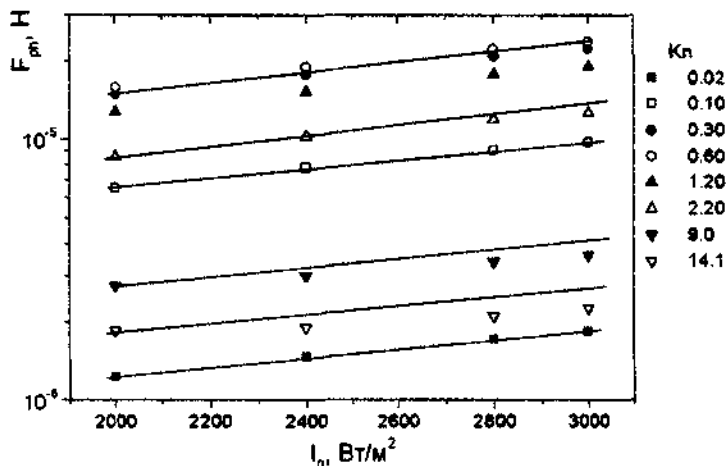


Рис. 9. Зависимость фотофоретической силы от интенсивности излучения для фторопласта $\Phi-4$ в гелии при различных числах Кнудсена

Причиной нарушения линейности является увеличение **температуры** поверхности частицы, поэтому логично в качестве определяющего параметра взять **приведенную** среднюю температуру поверхности частицы. В случае полной аккомодации для всего диапазона давлений ее можно записать как

$$\tau_0 = \frac{\bar{T}_s - T_0}{T_0} = \frac{I_0 J_0}{4\sigma T_0^3 + \frac{1}{\frac{R_0}{\lambda_g} + \frac{T_0}{P_0} \left(\frac{\pi m}{2k_B T_0} \right)^{1/2}}} \quad (6)$$

Как показывает анализ результатов данной работы, систематические отклонения от линейно зависимости фотофоретической силы от интенсивности излучения начинаются при $\tau_0 > 0,1$.

Следует отметить, что для аэрозольных частиц реальных размеров слабое, отвечающее за радиационную теплоотдачу, обычно пренебрежимо

мало по сравнению с величиной **кондуктивного** теплообмена, однако для макроскопических частиц, используемых в модельных экспериментах, получается обратная ситуация. Этим объясняется тот факт, что отклонения от линейности проявляются при сравнительно невысоких **интенсивностях** излучения, в то время как в экспериментах с микронными частицами в интенсивном лазерном пучке зависимость **фотофоретической** силы от интенсивности излучения остается **линейной**.

Для исследования закономерностей *отрицательного фотофореза* использовались две модельных частицы: сплошная стеклянная сфера и полая герметичная стеклянная сферическая оболочка. Одна половина поверхности частиц была зачернена краской. Фактор асимметрии поглощения J_1 для освещенной черной стороны **-0,45**, для освещенной **прозрачной** стороны **0,08** в случае полой оболочки и соответственно **-0,45** и **0,00** для сплошной стеклянной сферы. Таким образом, сплошная стеклянная сфера способна испытывать только положительный **фотофорез**, что было экспериментально зафиксировано. Причина такого результата для сплошной сферической частицы объясняется эффективным поглощением инфракрасных лучей в ее объеме, что приводит к равномерному нагреву частицы, и необходимой для возникновения фотофоретической силы асимметрии температуры не возникает. Для полой сферической оболочки наблюдался как положительный, так и отрицательный эффект (рис. 10).

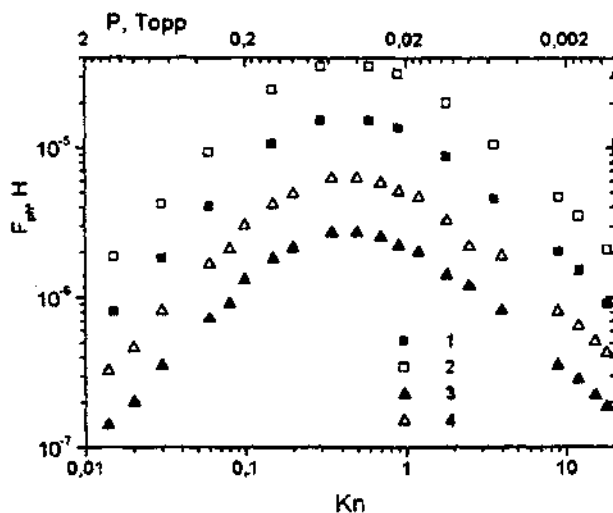


Рис. 10. Положительный и отрицательный фотофорез герметичной стеклянной сферической оболочки при различных **интенсивностях** излучения:
 1 - положительный при 2000 Вт/м^2 , 2 - положительный при 2300 Вт/м^2 ,
 3 - отрицательный при 2000 Вт/м^2 , 4 - отрицательный при 2300 Вт/м^2

Измерения **силы, действующей** полую стеклянную оболочку, производились в воздухе при различных **давлениях** и **интенсивностях** излучения. Радиус частицы 6,25 мм, теплопроводность $\lambda_p = 0,12$ Вт/м К, относительная теплопроводность в воздухе $\Lambda = 6$. Все описанные выше **закономерности фотофореза** имеют место как в случае положительного, так и отрицательного эффекта. Направление фотофоретической силы определяется единственным параметром - фактором асимметрии поглощения излучения J_1 . **Фотофоретическая** сила не фиксируется, если этот параметр стремится к нулю.

Оценка возможности фотофоретической левитации аэрозольных частиц в атмосфере Земли.

Модели вертикального переноса, основанные на идее **седиментационно-диффузионного** равновесия, сталкиваются с затруднениями при описании наблюдаемой высотной стратификацией аэрозоля. Одной из возможных причин движения частиц против силы тяжести может являться отрицательный **фотофорез** в поле солнечного излучения и положительный **фотофорез** в уходящем с земной поверхности инфракрасном излучении. К настоящему времени нет единой точки зрения на потенциальную значимость этого эффекта.

Оценим возможное соотношение сил, действующих на типичные аэрозольные частицы в поле солнечного излучения в спокойной атмосфере. Действие силы тяжести вызывает оседание частиц в нижние слои атмосферы. Положительная **фотофоретическая** сила направлена так же, как и сила тяжести, и левитация невозможна. Если частица испытывает отрицательный фотофорез, то на определенной высоте Z^* сила отрицательного фотофореза может уравновесить силу тяжести. Поскольку действие других сил можно считать малым, пользуясь выводами настоящей работы, можно записать условие левитации

$$\frac{IJ_1 F(Kn^*, \Lambda)}{2(8RT / \pi M)^{1/2} R_0 \rho g} = 1, \quad (7)$$

где ρ - плотность вещества частицы, $F(Kn^*, \Lambda)$ - функция числа Кнудсена, при котором возможна левитация, и относительной теплопроводности частицы и газа, g - ускорение свободного падения. Для того чтобы **фотофоретическая** сила была сопоставима с силой тяжести, фактор асимметрии должен достигать максимальных значений, т.е. частица должна сильно поглощать излучение.

Как показали расчеты, использование значений плотности и **теплопроводности, характерных** для массивных сплошных материалов, условие (7) не выполняется в стратосфере и мезосфере. Однако, пользуясь известным фактом, что реальные аэрозольные частицы микронных и субмикронных размеров, как правило, являются агрегатами из более мелких частиц или многослойными частицами, оказывается возможным варьировать значения **теплофизических** параметров относительно их значений для массивных образцов.

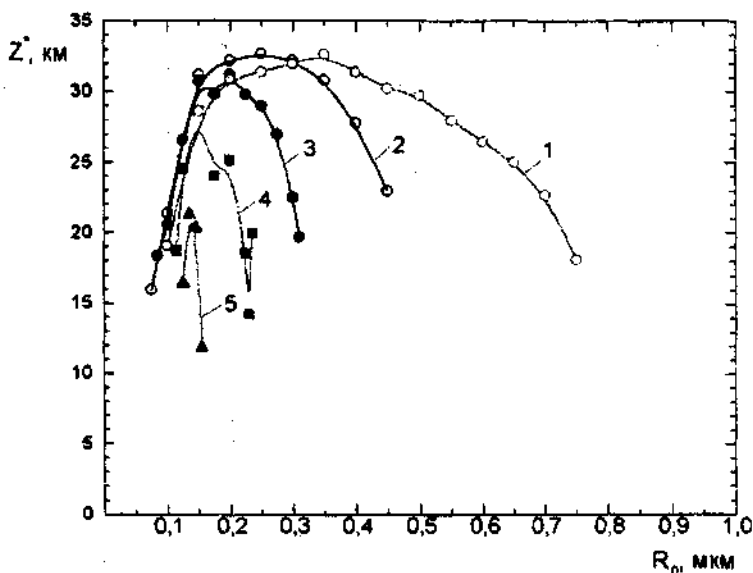


Рис.11. Зависимость высоты фотофоретической левитации от радиуса углеродных частиц при различных значениях κ :
1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,3; 5 – 0,4

Результаты оценок высоты левитации Z^* углеродных частиц представлены на рис.11. В расчетах приняты следующие значения параметров: плотность $\rho = 165 \text{ кг/м}^3$, относительная теплопроводность $L = 5$, комплексный показатель преломления $m = n - i\kappa$ для длины волны 500 нм $n = 1,95$, $\kappa = 0,05 \div 0,4$. Для определения зависимостей давления и температуры от высоты используется модель стандартной атмосферы. Видно, что частицы с различными значениями κ могут испытывать левитацию за счет сил отрицательного радиометрического фотофореза на высотах от 15 до 33 км, что соответствует промежуточному и свободномолекулярному режиму и условиям нижней стратосферы [9].

Таким образом, фотофоретическая сила может являться существенным фактором, влияющим на вертикальный перенос аэрозольных частиц определенных типов и конкурирующим по величине с силой тяжести в стратосфере Земли. В мезосфере этот механизм оказывается малоэффективен из-за высокой степени разреженности воздуха. В тропосфере перенос аэрозоля в значительной степени обусловлен конвективными потоками, поэтому фотофорез вряд ли может оказывать существенное влияние на динамику аэрозоля на высотах менее 10 км от земной поверхности.

1. **Восстановлена и усовершенствована** экспериментальная **установка**, **воз-**
ляющая измерять малые **силы**, действующие на **образец**, находящийся в
газе в широком диапазоне **давлений**, при помощи крутильных весов с ем-
костным датчиком смещения коромысла и электростатической компенса-
цией измеряемой силы. Минимизированы **погрешности** в определении
оптических и **теплофизических** свойств частиц, интенсивности излучения.
2. Корректно поставлена и решена задача экспериментального исследова-
ния явления **фотофореза** при известных значениях определяющих пара-
метров. Впервые получены систематические результаты измерения **фото-**
форетической силы в диапазоне чисел **Кнудсена** $Kn=0.001+20$ в одноатом-
ных и многоатомных газах при изменении отношения теплопроводности
частицы к теплопроводности газа от 6 до 380, **интенсивностей** излучения
от 500 до 3000 Вт/м².
3. Проведено моделирование положительного и отрицательного фотофо-
реза с помощью модельных частиц с различными факторами асимметрии
поглощения **излучения**.
4. Зависимость **фотофоретической** силы от степени разреженности газа
имеет характерный куполообразный вид с максимумом в области $Kn=0,2+0,5$.
На положение максимума влияет относительная теплопроводность
частицы и газа, род газа и состояние поверхности частицы. В **свободномо-**
лекулярном режиме зависимость фотофоретической силы от числа Кнуд-
сена обратно **пропорциональная**, в вязком со скольжением - прямо про-
порциональная.
5. Исследована зависимость силы от интенсивности оптического излуче-
ния. Экспериментально подтверждены границы применимости **линейной**
теории.
6. Обнаружена выраженная зависимость фотофоретической силы от ха-
рактера взаимодействия молекул газа с поверхностью частицы. Показано,
что коэффициенты аккомодации энергии и нормального импульса моле-
кул газа на поверхности частицы оказывают совместное влияние на **фото-**
форетическую силу, которое может быть формализовано введением «ра-
диометрического» коэффициента аккомодации.
7. Исследована зависимость фотофоретической силы от размера частицы
при фиксированном давлении газа. Показано, что зависимость степенная,
с показателем степени, монотонно возрастающим от единицы до трех при
переходе от вязкого со скольжением к **свободномолекулярному** режиму.
Для модельных частиц в **свободномолекулярном** режиме монотонность
нарушается из-за существенной роли радиационного теплообмена нагретой
частицы и окружающей среды.
8. Проведено сравнение полученных результатов с известными теориями
фотофореза. Установлено, что результаты расчетов **Береснева С.А**, Черня-
ка **В.Г** и **Фомягина Г.А.** [19, 20] - наиболее общая и единственная приме-
нимая ко всему диапазону чисел Кнудсена теория - хорошо согласуются с
экспериментальными данными при реальных значениях коэффициентов

аккомодации для технических поверхностей во всем исследованном диапазоне определяющих параметров, за исключением нелинейного по интенсивности излучения случая.

9. Проведена оценка возможности **фотофоретической** левитации аэрозольных частиц в атмосфере Земли. Показано, что радиометрический **фотофорез** может быть причиной длительного пребывания сажевого аэрозоля в стратосфере Земли.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Preining O.** *Photophoresis*. In: *Aerosol Science* (ed. C.N. Davies). N.Y.: Academic Press, 1966. P. 111-135.
2. **Береснев С.А., Черняк В.Г., Фомягин Г.А.** *Кинетическая теория фотофореза II Теплофиз. высоких темпер.* 1988. Т. 26. № 1. С. 120-130.
3. **Береснев С.А., Кочнева Л.Б.** *Фактор асимметрии поглощения излучения и фотофореза аэрозолей II Оптика атмосферы и океана.* 2003. Т. 16. №2. С. 134-141.
4. **Yalamov Yu.I., Kutukov V B., Shchukin E.R.** *Theory of the photophoretic motion of the large-size volatile aerosol particle* J. Colloid Interface Sci. 1976. V.57. No.3. P.564-571.
5. **Шахов Е.М.** *Методы исследования движений разреженного газа.* М.: «Наука». 1974.
6. **Боголепов А.И., Быстрай Г.П., Береснев С.А., Черняк В.Г., Фомягин Г.А.** *Экспериментальное и теоретическое исследование фотофореза в разреженном газе II Теплофиз. высоких темпер.* 1991. Т.29, N4. С.750-758.
7. **Боголепов А.И., Суетин П.Е., Береснев С.А., Быстрай Г.П., Черняк В.Г.** *Фотофорез модельных аэрозольных частиц II Теплофиз. высоких темпер.* 1996. Т.34, N5. С.751-756.
8. **Rohatschek H.** *Direction, magnitude and causes of photophoretic force.* J. Aerosol Sci. 1985. V. 16. No. 1. P.29-42.
9. **Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Рунков В.А., Суетин П.Е., Черемисин А.А.** *О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере.* Оптика атмосферы и океана. 2003. 16, №1, С.52-57.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Рунков В.А., Старинов А.В., Суетин П.Е.** *Теплофизическая задача фотофореза II Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып.1 [Сб. научных трудов], Екатеринбург, УрО РАН.* 1997. С.212-218
2. **Старинов А.В., Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Рунков В.А., Суетин П.Е.** *Расчет фактора эффективности поглощения оптического излучения каплями водного и водосодержащего аэрозоля II Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып.1 [Сб. научных трудов], Екатеринбург,*

3. Ковалев Ф.Д., Рунков В.А., Суетин П.Е. *Об измерении интенсивности излучения в условиях вакуума II Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Издательство МЭИ, 1998. С.295-297.*
4. Ковалев Ф.Д., Суетин П.Е. *О систематической погрешности измерения температуры термopами II Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости. М.: Издательство МЭИ. 1998. С.150-153.*
5. Kovalev F.D., Suetin P.E. *Optical properties of model aerosol particles II J.Aerosol Sci. 1999, V.30. Suppl.1. PP. S281-S282.*
6. Ковалев Ф.Д. *О совершенствовании модельного метода исследования газодинамического аспекта фотофореза II Аэрозоли Сибири. Тезисы докладов VI рабочей группы. ИОА СО РАН. Томск, 1999. С.95-96.*
7. Ковалев Ф.Д., Гулин М.В. *Измерение коэффициентов теплопроводности модельных аэрозольных частиц II Аэрозоли Сибири Тезисы докладов VI рабочей группы. ИОА СО РАН. Томск, 1999. С.102-103.*
8. Kovalev F.D., Shishkin A.D. *Particle movement observation using video data technique II Abstracts of the European Aerosol. Conference 2001/ J.Aerosol Sci. V.32, Sup.1. P.573-574.*
9. Ковалев Ф.Д., Шишкин А.Д., Суетин П.Е. *Измерение фотофоретической силы в широком диапазоне определяющих параметров II Аэрозоли Сибири. Тезисы докладов IX рабочей группы. ИОА СО РАН. Томск, 2002. С.12.*
10. Ковалев Ф.Д., Шишкин А.Д. *Измерение фотофоретической силы модельным методом параметров II Аэрозоли Сибири. Тезисы докладов VIII рабочей группы. ИОА СО РАН. Томск, 2001. С.72.*
11. Ковалев Ф.Д., Шишкин А.Д. *Измерение фотофоретической силы телевизионным методом II Аэрозоли Сибири. Тезисы докладов IX рабочей группы. ИОА СО РАН. Томск, 2001. С.73.*
12. Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Рунков В.А., Суетин П.Е., Черемисин А.А. *О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере. Оптика атмосферы и океана. 2003. 16, №1, С.52-57.*

Подписано в печать 22.04.2003. Формат 60х84 1/16
Бумага типографская. Усл.печ.л. 1,5. Тираж 100 экз.
Заказ № 167. Печать офсетная. 620083, Екатеринбург,
К-83, пр.Ленина, 51. Типолаборатория УрГУ